

## 論文の内容の要旨

論文題目 Solid State Recycle Processing of Light Alloys for High Performance

(軽量合金材料の高信頼性化のための固相リサイクルプロセス)

氏名 ルアンバラナン タチャイ

### 1. 序言

人間社会生活の向上を目指した新しい考え方は、持続的で、環境に適合し、かつ適切なコストで生産できる先端製造、材料プロセスに立脚する。特に、生産技術の視点から考えると、社会は持続的成長を成功裡に行うためには、個々の消費者が物質あるいは製品をリサイクル、再利用するのみならず、ものを生産する産業においても、リサイクル材を積極的に利用する必要がある。現行のアルミ合金あるいはマグネシウム合金材料のリサイクルはスクラップ材の再溶解によっている。したがって、使用エネルギーが増大することに加え、有毒なフラックスの使用、副産物として有害なガス成分を放出することになる。ここに、従来の再溶解 - 凝固技術に係る種々の問題点を解消するリサイクル技術の革新をはかる必然性がある。現行の再溶解リサイクルの技術的限界は、スクラップ金属材料を溶解 - 凝固するプロセスに起因している。したがって、技術的なブレークスルーは、別のリサイクル過程を新たに探査することから始まる。本論では、室温で稼動する固相リサイクルによる材料プロセスを提案する。この方法では、中間段階での処理ステップ数を最小にしつつ、リサイクル材を生産材に変換する。さらに、このリサイクルでは、出発材料の質を保持したまま、あるいは質に向上を生産材で達成できるため、物質循環ループを持続することが可能である。一方、この種の技術的革新を伴わない場合には、物質フローは高純度、高品質材から低品質、廃棄材への一方向となってしまう。

本論文では、軽量合金材料の高度なプロセスを確立することを目的とする。すなわち、出発材料の形状・形態に関係なくリサイクルを行う、モルフォロジー・フリー・プロセスを

開発する。ただし、本提案プロセスは、アルミ合金、マグネシウム合金などの軽量合金材料のリサイクルを前提とする。

## 2. 研究内容

実際のプロセス手順は、バルク・メカニカル・アロイング (Bulk Mechanical Alloying ; 以下 BMA と略す) による初期固化成形・均質化と熱間鍛造・熱間押し出しによる 2 次固化成形からなる。2 次固化成形に関しては、従前の金属塑性加工技術に準じて設計することができる。BMA 後の材料は、相対密度が 80 - 90% 程度の高密度成形体であり、これを 2 次固化成形で真密度の製品形状まで固化成形する、(図 1)。

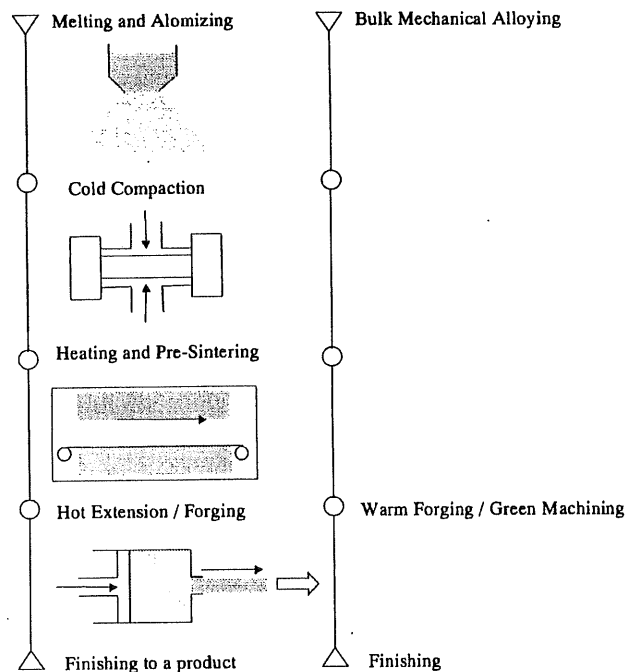


図 1 固相リサイクルプロセスとアトマイジングから初期焼結までの商用プロセスの比較

本プロセスの有用性を実証するために、Al-12mass%Si、AZ91、AZ31 合金を用い、出発材料はそれぞれの合金の破砕、切削チップ材とした。プロセス後の材料は微細組織を有し、強度、摩耗特性ともに優れた特性を有していた。特に、Al-12mass% Si 材料に関しては、その引張り特性ならびに硬さは Si 粒サイズならびに熱処理履歴に依存することを明らかにし

た。

例えば、サイクル数 500 回までの BMA 後、773K で 10 分熱処理した材料では、引張強度で 431MPa、ロックウェル硬さで 81 HRB に達した。合金中の Si 粒サイズは BMA 中のサイクル数増加に伴い、単調に減少する。この微細組織により、流体潤滑ならびにアブレ-シブ摩耗領域で低摩擦係数を示す良好な耐摩耗特性が得られた。高い引張強度ならびに耐摩耗特性は、微細な Si 粒の最適な配置によると考えられる。ただし、高強度材料に一般的に見られるように、均一伸びは減少した、(図 2)。

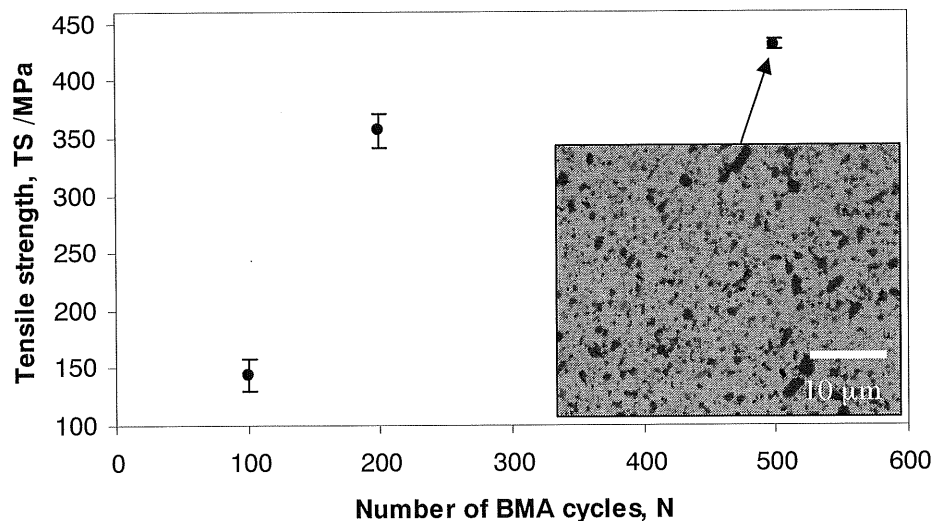


図 2 Al-12 Mass% Si 材の機械的性質

BMA におけるサイクル数増加に伴う Al-12 Mass% Si 材の硬化挙動に関しては以下で説明できる。BMA 中、被加工材は、押し出し - 圧縮モードで反復的に強加工に晒される。アルミ・マトリックスは塑性変形により強加工時のエネルギーを散逸できるが、Si 相は脆性であるため、アルミ・マトリックス中で破砕する。

一般にマイクロメカニクスによれば、2 相の変形機構の相違により、その界面には変形勾配が発生するため、これを整合化するために塑性変形する Al 相中には、幾何学的に必要な転位、いわゆる GN 転位が生じる。さらに、2 相が離反せずに変形を持続するためには、

界面に内部応力も発生する。この GN 転位の存在によって、アルミ・マトリックスは加工硬化する。Si 粒が微細に分布することにより、GN 転位密度も増加し、さらに加工硬化は分布粒子間距離により変化し、特に粒子間距離は  $10\mu\text{m}$ 以下になると、距離の減少に比して加工硬化は増大する。

BMA 材のように、微細な Si 粒子が比較的短距離で存在する場合には、加工硬化はより大きい Si 粒子を含む場合よりも速く生じる。特に、サブミクロンサイズの Si 粒子により、オロワン機構による加工硬化の促進も考えられる。小 Si 粒子は、転位密度の増加とともに、転位の運動も遅らせる。結局、BMA 材料の硬化挙動は、アルミ・マトリックス中の加工硬化とサブミクロンサイズの Si 粒子による分散硬化によると想定される。

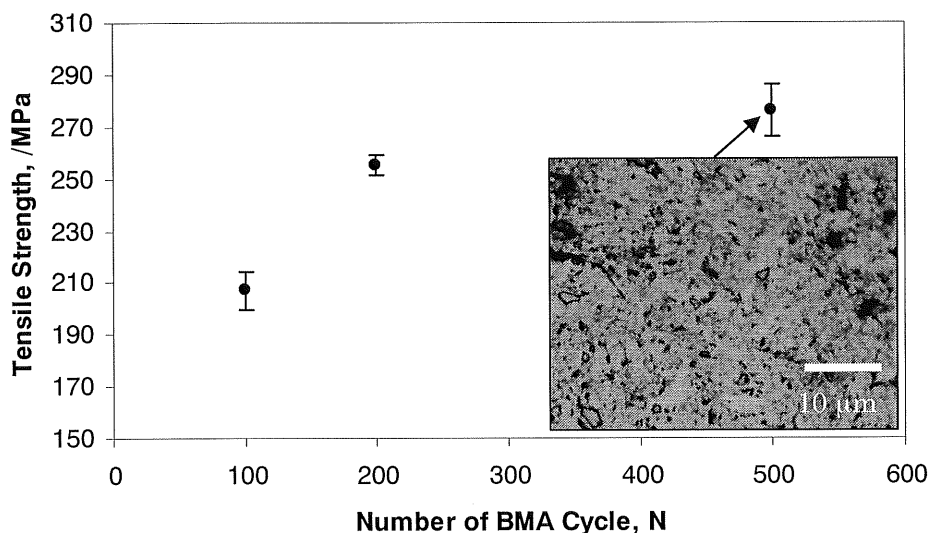


図 3 AZ91 材の機械的性質

AZ91 ならびに AZ31 材の特性も BMA におけるサイクル数増大とともに向上する。すなわち、AZ91 では引張強度が  $255\text{MPa}$ 、AZ31 材では  $446\text{MPa}$  となる。延性に関しては、鋳造材である AZ91 材ではその改善には限界があるが、AZ31 材に関しては、押し出し後で  $1.5 - 7.8\%$ の均一伸びを得た。特にサイクル数が少ない BMA では強度上昇は大きくないが、大きな延性が獲得できる。本プロセスによる微細組織には特徴があり、XRD 上ではほとんど

どピークが観測されないほどに Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 化合物が微細に分散している。長時間の熱処理後では、高度は低下し、XRD 上でも Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相が確認される、(図 3)。

プロセス後の成形材の特性は、その熱処理履歴に依存する。2 次固化成形までの予備加熱時間により、マトリックス硬さならびに化合物析出物形態も変化する。したがって、本プロセスでは、固相リサイクル材の力学特性は、BMA におけるサイクル数と 2 次固化成形条件により制御されることになる。

BMA 中における固化、均質化、微細化過程を記述するために、マイクロメカニクスによる評価に加えて、有限要素法による直接シミュレーションを行った。前述したように、BMA 中の圧縮 - 押し出しモードによる繰り返し荷重付加により、被加工材は大きな圧縮変形とせん断変形を受けることを確認した。特に、Al-12 mass%Si 材の場合には、せん断変形が微細化には有効であることを見出した。実際、アルミマトリックスの弾塑性変形に伴い、Si 粒子は過大な面力を受けるために破断することを理論的にも実証した。押し出しプロセスにおいて、押し出し比を 2 倍にすることで、プロセス時間を半分以下にしても、ほぼ同程度の力学特性が得られることを見出した。BMA 装置の負荷能力、ダイス強度など考慮すべき点はあるが、プロセス時間の短縮化は容易である。

固相プロセスにおけるエネルギー効率を、被加工材料の単位重量あたりの消費エネルギーを実測することで考察した。なお、通常のリリング型メカニカル・アロイングと異なり、オンラインで消費エネルギーを監視できる点も本プロセスのユニークな点である。市販される微細な組織、例えば Al-12mass% Si 材で言えば最大 Si 粒子径が約 5 - 7 μm を得るまでのサイクル数が最大 200 回であることから、Al-12 mass % Si 材での単位消費エネルギーは 136 MJ/Kg、AZ91 では 123MJ/kg となる。これは、鉍石から金属成分を抽出するのに要するエネルギーよりも少なく、また粉末冶金専門メーカーで採用している再溶解 - アトマイジング - 粉体成形 - 相対密度 80 - 90% までの焼結過程に要するエネルギーよりも小さい。これにより、固相リサイクルプロセスは、エネルギー消費効率の点からはきわめて優れた

手法であることがわかる。

さらに、金型潤滑選択、荷重負荷パススケジュール設計、ダイス設計などの最適化、BMA サイクル数の減少などによって、この実測したエネルギー消費を大きく減じることも可能である。ここで注目するのは、投入エネルギーの中で実際に使用される塑性仕事分の寄与である。実測されるエネルギーの約 40 - 50% が塑性仕事として消費されることを明かにした。パススケジュールが同一の場合、理論的に、散逸される塑性仕事量は、被加工材の変形抵抗に比例すると考えられる。実際、測定される塑性仕事量は純マグネシウム - マグネシウム合金 - Al 12 mass %Si の順で大きくなり、1 つの校正曲線上で整理される。塑性仕事以外の散逸エネルギー成分では、摩擦仕事散逸が重要であり、アルミ合金ではこの項の寄与が大きく、マグネシウム合金では小さいことから、対象とする被加工材に応じたプロセスの最適化も考慮すべきである。

### 3. 結論

以上より、固相リサイクルプロセスでは、破碎・切削チップ材を出発材料とし、消費エネルギーを最小にして、高強度バルク材料を生産するプロセスとして提案した。これにより、リサイクル材がら出発しても品質を低下されることなく、使用材料を再度製品として利用できる方向性を示した。ただし、対象とする部品は、鋳造プロセスを必要とする大型複雑部品ではなく、鍛造、粉体成形などで扱う中型・小型部品であり、変形抵抗の比較的小さい軽合金材料のリサイクルに適していると考えられる。特に、今後軽量化が期待される自動車部品、機械部品などへの展開が予想される。他のリサイクル手法と異なり、使用済み材料の破碎チップ材、Al への Fe 混入など異元素が入っても、同様な方法でリサイクルできる点も本手法の特徴である。実用に際しては、スケールアップの課題を検討する必要がある。前述したように、最適化すべきプロセス因子も多く、同一の投入エネルギーでも大幅な消費エネルギー効率を高めることができる点に加え、処理重量に比して表面摩擦仕

事損失が相対的に低下するスケールアップメリットもあり、今後、実用化に向けた議論も必要であろう。